Journal of Horticultural Science
https:// jhs.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 1, Spring 2022, p. 271-283

Linear Modeling of the Impact of Pests and Diseases on the Growth Process of Strawberry Plants in the State Space

Z. Abbasi[1], I. Zamani[2*], M. Shafieirad[3], A.H. Amiri Mehra[4], M. Hosseinifarahi[5,6]

Received: 13-06-2021 Revised: 17-07-2021 Accepted: 30-08-2021 Available Online: 20-06-2022	**How to cite this article:** Abbasi Z., Zamani I., Shafieirad M., Amiri Mehra A.H., and Hosseinifarahi M. 2022. Linear Modeling of the Impact of Pests and Diseases on the Growth Process of Strawberry Plants in the State Space. Journal of Horticultural Science 36(1): 271-283. (In Persian with English abstract) **DOI:** 10.22067/JHS.2021.70888.1062

Introduction

Strawberry is a significant fruit due to its rich sources of vitamins and plenty of antioxidants and grows worldwide. Thus, studies that provide information on topics in strawberry growth are momentous. Strawberry production is often threatened by various pests. Therefore, pest management is one of the most critical points in strawberry cultivation and production that have to be considered. There are several pests that can have detrimental effects on strawberry production. For example, thrips is an important pest for strawberry in a greenhouse condition. There are many ways to deal with greenhouse pests; one of the best ways is to observe greenhouse hygiene and sanitation and use the proper chemical pesticides. Yet, it is impossible to predict the plant's growth stages in the usual ways to predict the time of using chemical pesticides. The time of each growth stage's occurrence can be predicted only by using simulation models and considering the factors affecting plant growth, such as environmental factors, pests, disease, and nutrition. To this end, this study aims to model the growth process of strawberry plants by considering pests and diseases' impact.

Materials and Methods

Monitoring the growth stages is a critical component of a successful strawberry growth program. To harvest more, it is vital to develop effective predicting tools. There are several approaches to investigate the change in the size and form of planets based on some growth conditions over time. The best-known mechanism of analyzing the growth process mathematically is simulation modeling. Models can be used as an alternative for statistical analysis of harvest of crops. They enhance the inferences about productive behavior and can be used to evaluate experiments. To introduce a desirable model, it is required to identify the essential features of the growth process, such as environment and climate. In this work, the dynamics of growing strawberry, the evolution of their size in time and their forms are modeled. Meanwhile, the plant's reaction to environmental factors such as pests and effective management factors on the environment and climate created for plant growth is investigated.

Results and Discussion

The use of growth models increases the analysis that can be made about the productive behavior of strawberry plants. Moreover, the proposed model has efficiency in predicting plant growth. This model, including simple relationships and the general concept of growth, is useful for teaching, learning, and researching to analyze plant growth factors. Furthermore, the proposed model can study how plants react to

1, 3 and 4- Ph.D. Student, Assistant Professor and Ph.D. Student, Electrical Control Engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran, respectively.
2- Assistant Professor, Electrical and Electronic Engineering Department, Shahed University, Tehran, Iran
5- Associate Professor, Department of Horticultural Science, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran
6- Sustainable Agriculture and Food Security Research Group, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran
(*- Corresponding Author Email: zamaniiman@shahed.ac.ir)

environmental factors such as pests and significant management factors on the environment and climate of plant growth. Besides, the model can help scholars, researchers, and plant producers with the ability to predict the amount and manner of plant growth and the effect of changing the number of pests. In this paper, the amount of disease and pests' damage for different rates in the growth stages is shown by using the plant growth process's modeling to reduce the amount of damage caused by pests by predicting the amount of damage and provide applicable, low cost and practical solutions. According to the results obtained in this study, since the lack of pest control causes only four out of ten healthy fruits to reach the full growth stage, control and repel pests are essential.

Conclusion

From the results of this study, it can be concluded that greenhouse owners and producers can simulate several growing seasons in a matter of seconds and predict the amount of harvest and loss of their crop by considering the environmental information of the area of study in which they decide to plant and knowing the effective rates in the process of plant growth and having a model. The greenhouse owners can predict the number of healthy and infected plants using the desired model before harvest by using the help of horticultural experts, collecting information about their environment, climate, soil, etc., and using different aspects affecting plant growth in the desired area. This approach can be extended to other crops to investigate the treatment effects and the production behavior throughout the crop cycle. Using this method predicts the crop cycle and leads to fruit production in a shorter period because the producer can use pesticides at the right time of production to decrease the damages to pests.

Keywords: Numerical Simulation, Pests, State Space Modeling, Strawberry

نشریه علوم باغبانی
https:// jhs.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، ص ۲۸۳-۲۷۱

مدل‌سازی خطی تأثیر آفات و بیماری‌ها بر روند رشد گیاه توت فرنگی در فضای حالت

زهره عباسی[1]- ایمان زمانی[2]*- محسن شفیعی راد[3]- امیرحسین امیری مهرا[4]- مهدی حسینی فرهی[5,6]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

چکیده

گیاه توت فرنگی به دلیل داشتن منابع غنی از ویتامین‌ها و آنتی اکسیدان، میوه‌ای با ارزش است که در سراسر جهان نیز رشد می‌کند ولی تولید آن اغلب توسط آفات مختلف تهدید می‌شود. از این‌رو، مدیریت آفات باید به عنوان یکی از مهمترین نکات در کشت و تولید گیاه توت فرنگی مورد توجه قرار گیرد. آفت تریپس به عنوان یک آفت گلخانه‌ای می‌تواند اثرات مخربی در تولید توت فرنگی داشته باشد، با این‌حال، روش‌های زیادی برای مقابله با آن وجود دارد. یکی از بهترین راه‌ها رعایت بهداشت گلخانه و استفاده از سموم شیمیایی مناسب است. با این حال، پیش بینی مراحل رشد گیاه به روش های معمول برای پیش بینی زمان استفاده از سموم شیمیایی غیرممکن است. زمان وقوع هر مرحله‌ی رشد تنها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و با در نظر گرفتن عوامل موثر در رشد گیاه مانند عوامل محیطی، آفات، بیماری‌ها و تغذیه قابل پیش‌بینی است. به همین منظور، نویسندگان در این مطالعه با در نظر گرفتن تأثیر آفات و بیماری‌ها، روند رشد گیاهان توت فرنگی را مدل‌سازی می‌کنند. مشهورترین مکانیزم تجزیه و تحلیل فرآیند رشد از نظر ریاضی، مدل‌سازی است. از مدل‌ها می‌توان به عنوان جایگزینی برای تجزیه و تحلیل آماری در برداشت محصولات استفاده کرد. مدل‌سازی توان استنتاج رفتار گیاه را افزایش می‌دهد و می تواند برای ارزیابی آزمایشات مورد استفاده قرار گیرد. برای معرفی یک مدل مطلوب، شناسایی ویژگی‌های اساسی روند رشد، مورد نیاز است. در این مطالعه، پویایی رشد توت فرنگی توسط سه متغیر حالت (گل، میوه جوان، میوه کامل) مدل شده است. در همین حال، واکنش گیاه به عوامل محیطی مانند آفات (بطور خاص آفت تریپس) و عوامل مدیریت موثر بر محیط و آب و هوای ایجاد شده برای رشد گیاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل پیشنهادی با داشتن روابط ساده که در برگیرنده مفهوم کلی رشد است دارای کارآیی لازم در پیش‌بینی رشد گیاه است و همچنین ابزاری مفید به فایده برای تجزیه و تحلیل عوامل رشد گیاه است. همچنین می‌توان به محققان، پژوهشگران و تولیدکنندگان کمک کرد تا توانایی پیش‌بینی میزان و نحوه رشد گیاه، متاثر از تغییر تعداد آفات را داشته باشند. علاوه بر این، میزان بیماری و خسارت آفات برای نرخ‌های مختلف در مراحل رشد را نشان داده تا با پیش‌بینی آن بتوان میزان خسارت ناشی از آفات را با هزینه‌های کم و راه حل‌های عملی کاهش داده و آن‌ها را به مرحله اجرا درآورد. طبق نتایج به دست آمده در این مطالعه، از آنجا که عدم کنترل آفات باعث می‌شود از هر ده میوه سالم فقط چهار میوه به مرحله رشد کامل برسند، کنترل و دفع آفات ضروری است. با استفاده از مدل پیشنهادی صاحبان گلخانه‌ها و تولیدکنندگان می‌توانند در عرض چند ثانیه چندین فصل رشد را شبیه‌سازی کرده و با در نظر گرفتن اطلاعات زیست محیطی منطقه مورد مطالعه و نرخ‌های موثر در روند رشد گیاه، میزان برداشت و از بین رفتن محصول خود را پیش‌بینی کنند.

واژه‌های کلیدی: آفات، توت فرنگی، شبیه‌سازی عددی، مدل‌سازی فضای حالت

۱، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری استادیار و دانشجوی دکتری گروه برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان
۲- استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران
(*- نویسنده مسئول: Email: zamaniiman@shahed.ac.ir)
۵- دانشیار، گروه علوم باغبانی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران
۶- گروه پژوهشی کشاورزی پایدار و امنیت غذایی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

DOI: 10.22067/JHS.2021.70888.1062

مقدمه

توت فرنگی (*Fragaria* × *ananassa* Duch) گیاهی علفی، چند ساله از خانواده گلسرخیان و یک میوه محبوب با ارزش تغذیه‌ای منحصر به فرد (سرشار از مواد معدنی، پروتئین، فیبرهای غذایی، آنتوسیانین‌ها، ویتامین‌ها، ترکیبات فنلی و فلاونوئیدها) و عطر و طعم بسیار مطلوبی است می‌باشد (Farahi Hosseini, 2020). این میوه دارای ارزش غذایی و اقتصادی بالایی بوده که از نظر تولید میوه‌های ریز در دنیا پس از انگور در مقام دوم قرار دارد (Bessonov, 2008 و Salimi, 2016). زمان برداشت این میوه در زمان معمول و در مناطق معتدل، از اواخر اردیبهشت ماه تا اوایل تیرماه است. اما با پیشرفت تکنولوژی می‌توان با استفاده از روش‌های خاصی خارج از فصل، توت فرنگی را تولید کرد. نیاز روز افزون به محصولات کشاورزی موجب تغییر رویه از کشت بصورت گسترده به کشت متراکم شده است. یکی از روش‌های متداول برای کشت متراکم، کشت گلخانه‌ای است. کشت گلخانه‌ای یکی از روش‌هایی است که در جهت کنترل عوامل طبیعی و افزایش بهره وری در تولید به کار گرفته می‌شود (Ghaem Maghami, 2019). همچنین برای کشورهایی همچون کشور ایران که در منطقه‌ی خشک و کم باران قرار گرفته این موضوع از اهمیت بیشتری برخوردار است. اگرچه کشت گلخانه ای محیطی مناسب برای رشد گیاهان است، اما شرایط مناسبی را نیز برای رشد و تکثیر آفات فراهم می‌سازد و گاها موجب خساراتی به مراتب بیشتر از کشت در مزرعه می‌شود. حدود ۲۰۰ گونه آفات و بیماری‌ها بطور مستقیم و غیرمستقیم به توت فرنگی حمله می‌کنند (Kuhar, 2009). احتمالاً بعضی از انواع این آفات با توجه به عادت‌های زندگی می‌توانند در بیشتر گلخانه‌های دنیا وجود داشته باشد. تریپس[1] نیز یک نوع آفت مهم برای توت فرنگی در شرایط گلخانه است (Zamani, 2016). در شکل ۱ خسارت تریپس بر گیاه توت فرنگی نشان داده شده است.

برای تحلیل و شناخت آنچه در واقعیت اتفاق می افتد نیاز به استفاده از کامپیوتر به عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل عملکرد، وجود دارد. بنابراین باید ابتدا آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد را مدل‌سازی و در نهایت شبیه‌سازی کرد. مدل‌سازی، به معنی یافتن یک رابطه، بین ورودی (علت تغییر) با خروجی (نتیجه تغییر) سیستم است. به عبارت دیگر یعنی بدست آوردن یک رابطه بین ورودی و خروجی سیستم، بطوری‌که اگر یک سیگنال ورودی مشابه به سیستم و مدل شبیه‌سازی شده اعمال گردد، خروجی‌های سیستم اصلی و مدل تقریبا یکسان باشند. شبیه‌سازی نیز به معنی راه انداختن و زنده کردن مدل ریاضی با استفاده از کامپیوتر برای بازسازی واقعیت می‌باشد. از این‌رو برای بررسی نحوه رشد این گیاه با در نظر گرفتن آفت‌هایی که ممکن است با آن درگیر شود از مدل‌سازی ریاضی استفاده می‌کنیم. مدل‌سازی به پژوهشگران و محققان کمک می‌کند تا روند رشد گیاه را تحلیل کرده و درصورت لزوم رفتار آن را پیش‌بینی کنند. مدل‌سازی ریاضی، نه تنها در علوم طبیعی کاربرد دارد بلکه حتی در علوم پزشکی و بیولوژی نیز کاربرد گسترده‌ای دارد (Abbasi, 2020، Amiri Mehra, 2019، Amiri Mehra, 2020 و Abbasi, 2021) که نشان‌دهنده سهم به‌سزای آن برای تفسیر نتایج تجربی در این زمینه است. همچنین مدل‌های معادله دیفرانسیل معمولی[2] یکی از محبوب ترین مدل‌ها هستند که می‌توان از آن‌ها برای شبیه‌سازی دینامیک رشد گیاهان استفاده کرد.

گسترش مدل‌سازی و کاربرد گسترده آن در بررسی و تفسیر روند رشد و نمو گیاهان، نویسندگان بسیاری را بر آن داشته که به مدل‌سازی و شبیه‌سازی انواع گیاهان بپردازند. در همین راستا، نیکولای و همکاران در (Bessonov, 2000) به معرفی مدل گیاهان، مدل‌های دینامیکی و در نهایت به شبیه‌سازی این مدل‌ها پرداخته اند. همچنین در برنامه‌های کاربردی که با مدل‌سازی رشد گیاهان سروکار دارند، توجه بیشتری به ساختار توپولوژیکی گیاهان می‌شود. درک بهتر از ساختار توپولوژیکی گیاه به زیست شناس در پالایش دانش گونه‌های گیاهی کمک می‌کند. در همین رابطه، در مقاله (Godin, 1998) کریستف و همکاران سعی کرده اند تا ماهیت چند مقیاسی سازه‌های توپولوژیکی گیاهان را مدل کنند، به این صورت که تجزیه و تحلیل یا شبیه سازی رشد گیاهان در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف انجام شود.

بحث دیگری که می‌توان در گیاهان به آن پرداخت، ترتیب شاخه های اطراف ساقه است که تعیین کننده اصلی معماری گیاه است. با این حال، شکل خاص حالات شاخه‌ها مشخص نیست. در (Bessonov, 2008) نیکولای و همکاران الگویی انشعابی را پیشنهاد می‌کنند که به نظر می‌رسد با مشاهدات بیولوژیکی مطابقت دارد. آن‌ها یک گیاه در حال رشد را به عنوان یک سیستم مدل می‌کنند و فرض می‌کنند که تعداد و محل شاخه‌ها داده نشده اما مطابق قواعد معینی ظاهر شده و رشد می‌یابند که با استفاده از مدل‌سازی ریاضی مشخص می‌شود. علاوه بر این می‌توان فرآیندهای تصادفی را نیز برای مدل‌سازی ویژگی‌های عملکردی گیاهان در نظر گرفت که در مقاله (Jaeger, 1992) به‌طور کاربردی به آن اشاره شده است. در کتاب (Varenne, 2018) نیز فرانک با استفاده از مطالعات موردی و تفسیری از طیف وسیعی از رشته‌ها، با تأکید ویژه بر مورد مطالعات

1- Thrips

2- Ordinary Differential Equation Models

گیاهان نشان می‌دهد که چگونه و چرا رایانه‌ها، تغییراتی تدریجی و گسترده روی مدل‌های ریاضی انجام داده اند و چه عواملی منجر به گسترش مدل‌های شبیه‌سازی از دهه ۱۹۵۰ شده اند.



(c) (b) (a)

شکل ۱- خسارت آفت تریپس بر گیاه توت فرنگی

a) تریپس روی برگ. b) خسارت تریپس روی میوه توت فرنگی. c) خسارت تریپس روی برگ.

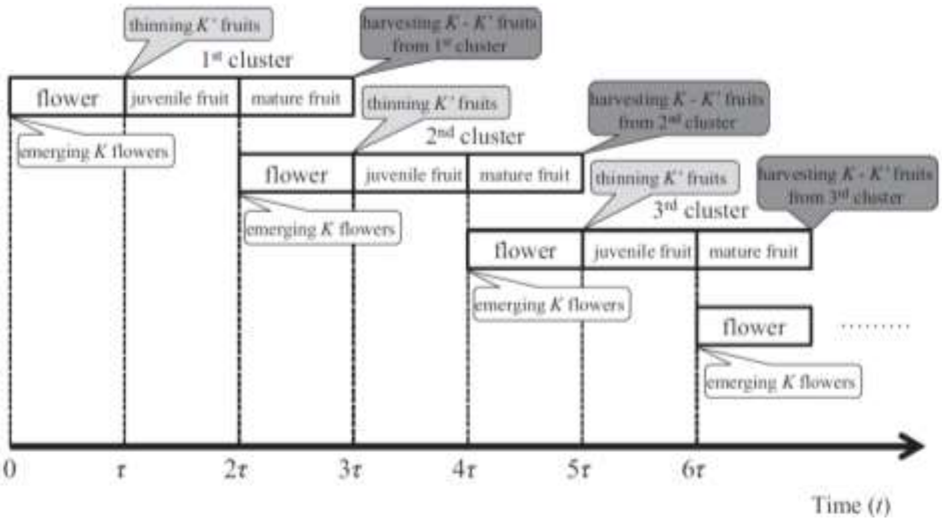
Figure 1- Thrips pest damage on the strawberry plant

a) Thrips on the leaves. b) Thrips damage on the strawberry fruit. c) Thrips damage on leaves

ساخت مدل در کشاورزی و به‌خصوص در تولید محصولات زراعی بر اساس پیدا کردن روابط منطقی و شناخت آن‌ها و تفسیر، تحلیل و بررسی این روابط با استفاده از شاخص‌های ریاضی است. اگرچه پیدا کردن این روابط به تجربه و تحقیقات گسترده نیاز دارد، اما پس از بدست آوردن اطلاعات لازم کمی کردن آن‌ها کار چندان مشکلی نیست (Behtri, 2014). آزمایشات و تحقیقات علمی نیازمند هزینه‌های زیاد و صرف وقت و دقت بسیار است که این موضوع برای کشورهای در حال توسعه به‌علت کمبود امکانات و پژوهشگر مشکل ساز است (Behtri, 2014). مدل در نظر گرفته شده در این مقاله نیز یک مدل پویا و وابسته به زمان است که به وضعیت سیستم در هر لحظه از زمان بستگی دارد. این مدل رشد و نمو گیاه توت فرنگی را شبیه‌سازی کرده و می‌تواند اثرات آفات را روی آن مورد ارزیابی قرار دهد. با استفاده از مدل‌سازی می‌توان روند رشد گیاه را تحلیل و تفسیر کرده، همچنین رفتار و عملکرد آن را در آینده پیش‌بینی کرد.

مواد و روش‌ها

ابتدا روند رشد گیاه توت فرنگی را بررسی کرده و در ادامه به مدل‌سازی دقیق آن می‌پردازیم. همانطورکه یوسوکه (Ikegawa, 2016) و ایمان (Zamani, 2016) ذکر کرده اند، سه مرحله را برای رشد توت فرنگی، یعنی مرحله گل‌دهی، تشکیل میوه و رسیدن میوه کامل فرض می‌کنیم. در شروع شبیه‌سازی $(t = 0)$، اولین خوشه دارای K گل و بدون هیچ میوه‌ای نمایان می‌شود. سپس، تمام گل‌ها گرده افشانی می‌کنند و به‌صورت همزمان در $t = s$ (در طی ۷ روز) به میوه‌های جوان تبدیل می‌شوند. سپس، تعداد K_0 تا از میوه‌های جوان نازک می‌شوند ($K \geq K_0$; $K_0 = 0$ به معنای نازک نشدن میوه است). تعداد $K - K_0$ از میوه‌های جوان باقیمانده پس از طی مراحل زمانی بیشتر به میوه‌های کامل تبدیل می‌شوند $(t = 2s)$. در همان زمان که خوشه قدیمی به مرحله میوه کامل تبدیل می‌شود، یک خوشه جدید با K گل نمایان می‌شود (تعداد $K - K_0$ میوه کامل در خوشه قدیمی و تعداد K گل به طور همزمان در خوشه جدید وجود دارد). بعد از طی مراحل زمانی بیشتر $(t = 3s)$، تمام میوه‌های کامل در خوشه قدیمی برداشت می‌شوند و گل‌های موجود در خوشه جدید به میوه‌های جوان تبدیل می‌شوند (کلیه مراحل به‌صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است). پس از این، ما یک گل، میوه‌ی جوان یا میوه‌ی کامل را به عنوان زیستگاه آفت و دشمن طبیعی می‌دانیم. شدت اغتشاشات دوره‌ای به نسبت میوه‌های جوانی گفته می‌شود که با نازک شدن میوه از بین می‌روند $\left(\frac{K_0}{K}\right)$. فرض می‌کنیم که یک آفت و دشمن طبیعی در K_0 محل‌های نازک شده همزمان با نازک شدن میوه حذف می‌شود. به همین ترتیب، آفات در $K - K_0$ محل برداشت هنگام انجام برداشت حذف می‌شوند.



شکل ۲- نمایش شماتیک مراحل رشد توت فرنگی در طول دوره زمانی (t).

s مدت زمان هر مرحله از رشد توت فرنگی را نشان می‌دهد.

Figure 2- Schematic representation of strawberry growth stages during time period (t)

"s" indicates the duration of each stage of strawberry growth.

اولین گام در فرآیند تحلیل سیستم‌ها، تشکیل مدل‌های ریاضی مناسب برای سیستمی است که می‌خواهیم آن را تحلیل کنیم. سیستم‌های دینامیکی[1] یا همان سیستم‌های پویا، سیستم‌هایی هستند که بر اساس یک قانون خاص، نسبت به زمان تغییر می‌کنند. در بسیاری از سیستم‌ها، این قانون را می‌توان با یک مجموعه معادلات دیفرانسیل مرتبه اول به‌صورت زیر بیان کرد

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t), t) \quad (۱)$$

که در آن $x(t)$ بردار حالت و $u(t)$ بردار ورودی‌های خارجی سیستم بوده که در این مقاله در نظر گرفته نشده و در اینجا f تابعی خطی است. منظور از حالت در یک سیستم، متغیرهایی هستند که بیانگر رفتار سیستم می‌باشند. در اینجا سیستم، چرخه تکامل گیاه توت فرنگی در طول زمان می‌باشد که شامل سه متغیر (حالت) گل، میوه جوان و میوه کامل می‌باشد و منظور از "فضای حالت" مجموعه‌ای از مقادیر است که متغیرها (حالات) می‌توانند اختیار کنند. $\dot{x}$ مشتق حالات بر حسب زمان است که نشان دهنده تغییرات هر کدام از حالت‌ها در طول زمان می‌باشد که تابعی از خود حالات است. در مهندسی کنترل، "نمایش فضای حالت"[2]، یک مدل ریاضی از یک سیستم فیزیکی به‌صورت مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی، خروجی و حالت مربوط به معادلات دیفرانسیل مرتبه اول است. به بیان دیگر، فضای حالت فضایی است که در آن متغیرهای روی محورها، متغیرهای حالت هستند. در نتیجه، نمایش فضای حالت برای رشد توت فرنگی به‌صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{F}(t) = -\alpha F(t) \\ \dot{J}(t) = \alpha F(t) - (\beta + \xi) J(t) \\ \dot{M}(t) = \xi J(t) \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن $F(t)$، $J(t)$ و $M(t)$ به ترتیب بیانگر تعداد گل، میوه جوان و میوه کامل در واحد زمان (t) هستند. همچنین $\dot{F}(t)$، $\dot{J}(t)$ و $\dot{M}(t)$ نیز به ترتیب نشان دهنده آهنگ تغییرات تعداد گل، میوه جوان و میوه کامل در واحد زمان هستند. α، β و ξ به ترتیب نرخ تبدیل گل به میوه‌ی جوان، نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفات و نرخ تبدیل میوه‌های جوان به میوه‌های کامل هستند.

از آنجاییکه نمایش فضای حالت خطی تغییر ناپذیر با زمان است پس می‌توان آن را به‌صورت زیر نوشت:

$$\dot{X}(t) = AX(t)$$

بطوریکه در آن $X(t) = [F \quad J \quad M]$ و $A = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & 0 \\ \alpha & -(\beta + \xi) & 0 \\ 0 & \xi & 0 \end{bmatrix}$ باشد.

معیارهای مختلفی وجود دارد که به کمک آن‌ها بتوان پایداری یا ناپایداری مجموعه نقاطی از فضای حالت سیستم را اثبات نمود. در نمایش فضای حالت سیستم‌های خطی تغییر ناپذیر با زمان، برای

1- Dynamic Systems
2- State Space Representation

بررسی پایداری کافی است محل مقادیر ویژه[1] سیستم را بررسی کرد. مقادیر ویژه ریشه‌های معادله مشخصه هستند. عبارت $|sI - A|$ را معادله مشخصه[2] گویند که علامت $|.|$ نشان دهنده دترمینان[3] یک ماتریس است. هنگامیکه مقادیر ویژه قسمت‌های حقیقی منفی دارند، پاسخ حالت گذرای سیستم با گذشت زمان به صفر میل می‌کند و پاسخ پایدار می‌ماند. هنگامیکه مقادیر ویژه قسمت‌های حقیقی مثبت داشته باشند، پاسخ به سمت بی نهایت همگرا می‌شود که در اینصورت آن‌را ناپایدار می‌نامیم. مقادیر ویژه مدل معرفی شده، $-\alpha$ و $-(\beta + \xi)$ هستند که با توجه به مثبت بودن پارامترها (α, β, ξ)، منفی هستند. در نتیجه سیستم پایدار است. برای مثال نمودارهای نشان داده شده در شکل ۳ (الف، ب و ج) که بیانگر تعداد گل‌ها، میوه‌های جوان و میوه‌های کامل هستند هیچگاه به سمت بی نهایت میل نمی‌کنند و به مقادیر ثابت و محدود رسیده و در آن باقی می‌مانند که این نشان‌دهنده کارایی مطلوب مدل‌سازی است.

نتایج و بحث

مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان، مجموعه‌ای از معادلات قابل ارزیابی هستند که چگونگی تأثیر تغییرات محیطی روی رشد و نمو گیاه را نشان می‌دهند تا درک پژوهشگران را از اساس فیزیولوژیکی این تغییرات بالا ببرند. مدل‌های رشد و نمو قادرند با ترکیب علوم خاک، اقلیم، فیزیولوژی گیاه و هواشناسی در قالب معادلات ریاضی، عملکرد گیاه را درگسترهٔ وسیعی از شرایط محیطی و عوامل و عملکرد مدیریتی شبیه‌سازی کنند. همانطور که ذکر شد مدل، شکل ساده شده‌ای از واقعیت است که بسته به نوع پژوهش و اهداف مورد نظر می‌تواند از معادلات بسیار ساده تا شکل بسیار پیشرفتهٔ آن که شامل تعداد زیادی از معادلات ریاضی می‌باشد متغیر باشد. امروزه به دلیل گسترش سریع تکنولوژی استفاده از مدل‌های ریاضی برای گیاهان در حوزه علوم کشاورزی پیشرفت‌های چشم گیری داشته است و پژوهشگران و محققان زیادی بر اساس اهداف مورد نیاز خود روش‌های متنوعی را برای مدل‌سازی در نظر گرفته اند.

دلیل انتخاب گیاه توت فرنگی

توت فرنگی نیز یکی از گیاهان باغی مهم کشور می‌باشد. از آنجاییکه این گیاه بیشترین برداشت در واحد سطح را نسبت به محصولات دیگر دارد و همچنین می‌توان از کشت آن در گلخانه‌های کوچک بیشترین سود را نسبت به دیگر محصولات داشت، برای مدل‌سازی در این مقاله انتخاب شده است. با این وجود هر ساله تعدادی از گل‌های توت فرنگی به علت وجود آفات و مدیریت و عملکرد نامناسب در کشت و تغذیه گیاه به میوه تبدیل نمی‌شوند، از این‌رو با توجه به اینکه تاکنون مدل‌سازی مراحل رشد گیاه توت فرنگی انجام نشده است، هدف اصلی از این مطالعه، ساخت و شبیه سازی یک مدل ساده است تا در عین سادگی، بتوان از آن برای پیش‌بینی رشد و بررسی عملکرد این گیاه در شرایط گلخانه‌ای استفاده کرد.

نتایج نظری مدل‌سازی توسط نرم افزار متلب

در این بخش ما با استفاده از نرم افزار متلب که پرکاربردتر از نرم افزار CDSs-Model است، به بررسی نتایج بدست آمده از مدل‌سازی بخش قبل پرداخته و شبیه‌سازی می‌کنیم. تعداد گل‌ها در قالب یک جمعیت آماری برابر با ۱۰ عدد در نظر می‌گیریم $(K = 10)$ که به سادگی قابل تعمیم به تعداد بالاتر نیز می‌باشد. نرخ تبدیل گل به میوه جوان را برابر با ۰/۷ $(\alpha = 0.7)$ و نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل را ۰/۲ $(\xi = 0.2)$ در نظر می‌گیریم. بطور مثال اگر نرخ تبدیل گل به میوه جوان ۰/۷ باشد، یعنی هفتاد درصد این تعداد گل‌ها در واحد زمان، به میوه جوان تبدیل می‌شوند. این قضیه بطور مشابه برای نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل نیز صادق است. بنابراین سه حالت ممکن پیش رو داریم:

نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل از نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت بیشتر باشد. $(\xi > \beta = 0.1)$

در این قسمت از توابعی (که معمولا بر حسب زمان هستند) برای نشان دادن تغییرات هر کدام از مراحل رشد گیاه (گل، میوه جوان، میوه کامل) استفاده می‌شود. در واقع، از آنجا که زمان همواره در حال سپری شدن است، زمان خاصی را به عنوان مبدا زمان در نظر گرفته و تغییرات مراحل را بر حسب زمان رسم می‌کنیم.

شکل ۳ بیانگر روندی است که به ترتیب، تعداد گل‌ها، میوه جوان و میوه کامل، در طول زمان (دوره ۲۰ روزه) طی می‌کنند. همانطور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌کنید، تعداد گل‌ها در ابتدا $(t = 0)$، ده عدد می‌باشد که به مرور زمان از تعداد آن‌ها کاسته می‌شود (زیرا به به میوه جوان تبدیل می‌شوند) و در نهایت در $t = s$ (در طی ۷ روز) به صفر می‌رسند که نشان دهنده این است که تمام گل‌ها به میوه جوان تبدیل شدند (در اینجا آفت طوری در نظر گرفته شده است که فقط روی میوه جوان تاثیر گذار باشد، یعنی هیچ گلی در این مرحله بر اثر آفت از بین نمی‌رود). با مشاهده شکل (۳-ب) به این نتیجه می‌رسیم که تعداد میوه‌های جوان در ابتدا $(t = 0)$، صفر عدد بوده است زیرا هیچ گلی به میوه جوان تبدیل نشده است، رفته رفته با کم شدن تعداد گل‌ها به تعداد میوه‌های جوان افزوده می‌شود اما تعداد میوه‌های جوان نیز پس از مدتی کاهش می یابد که به دو دلیل انجام می‌گیرد: تاثیر آفت و تبدیل شدن به میوه کامل.

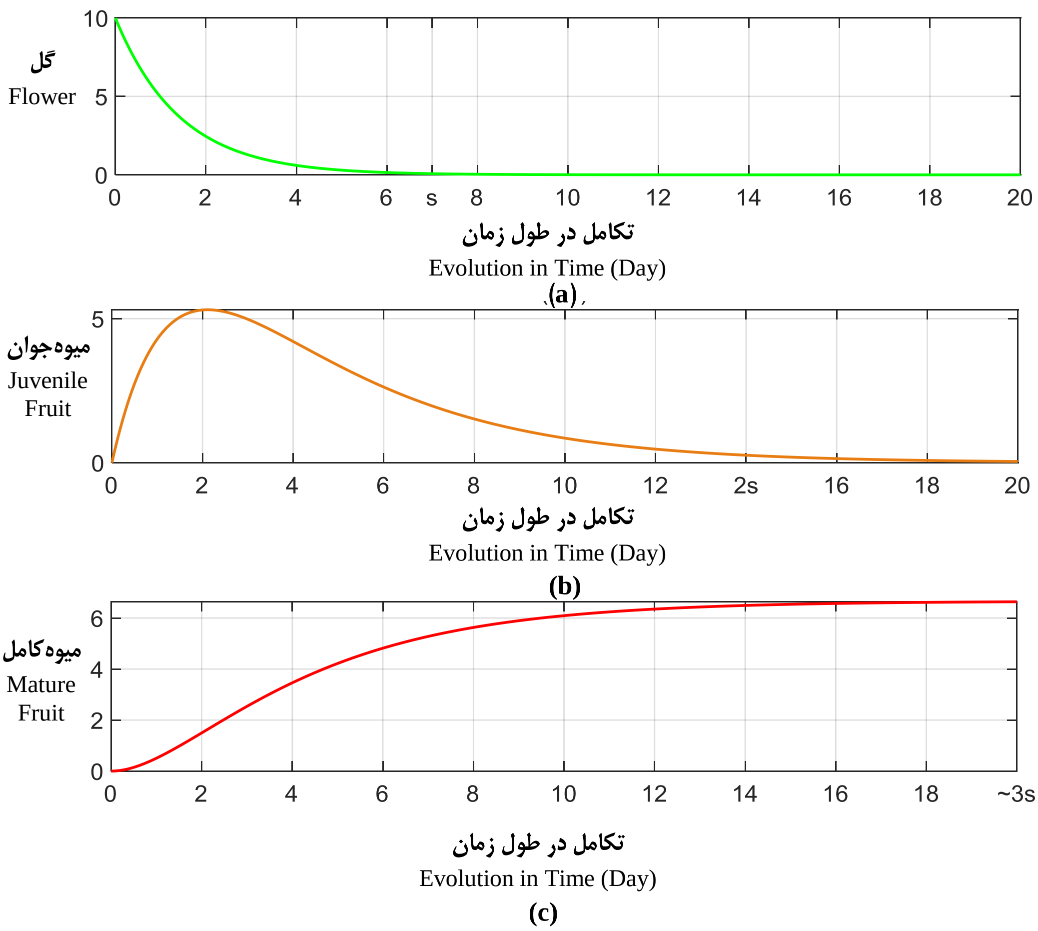
1- Eigenvalues
2- Characteristic Equation
3- Determinant

همانطور که ذکر شد، از آنجاییکه نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل از نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت بیشتر است، یعنی تعداد بیشتر از میوه‌های جوان به میوه کامل تبدیل می‌شوند و تنها تعداد کمی از آن‌ها در اثر آفت نابود می‌شوند. بنابراین، صفر شدن تعداد میوه‌های جوان در $t = 2s$ نشان دهنده این است که میوه‌های جوان یا به میوه کامل تبدیل شدند یا در اثر آفت از بین رفته‌اند. همچنین در شکل (۳-ج) در $t = 3s$ از ۱۰ گل تعداد بیشتری از آن‌ها (۶ عدد) به میوه کامل تبدیل شدند و تنها ۴ عدد در اثر آفت نابود شدند. در جدول ۱ نیز تعداد گل، میوه جوان و میوه کامل در هر روز برای حالت اول $(\xi > \beta = 0.1)$ مشخص شده است.

جدول ۱- تعداد گل، میوه جوان و میوه کامل به تفکیک در حالت اول $(\xi > \beta = 0.1)$

Table 1- Number of flowers, juvenile fruit and mature fruit separately in the first case $(\xi > \beta = 0.1)$

روز Day / تعداد Number	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
گل Flower	~2	~1	0	0	0	0	0	0	0	**0**
میوه جوان Juvenile Fruit	5	4	3	2	1	1>	1>	0	0	**0**
میوه کامل Mature Fruit	1	4>	5	6>	6	6<	6<	6<	6<	**6<**



شکل ۳- مراحل رشد توت فرنگی در حالت اول $(\xi > \beta = 0.1)$

Figure 3- Stages of strawberry growth in the first case $(\xi > \beta = 0.1)$

(a): Flower, (b): Juvenile Fruit, (c): Mature Fruit

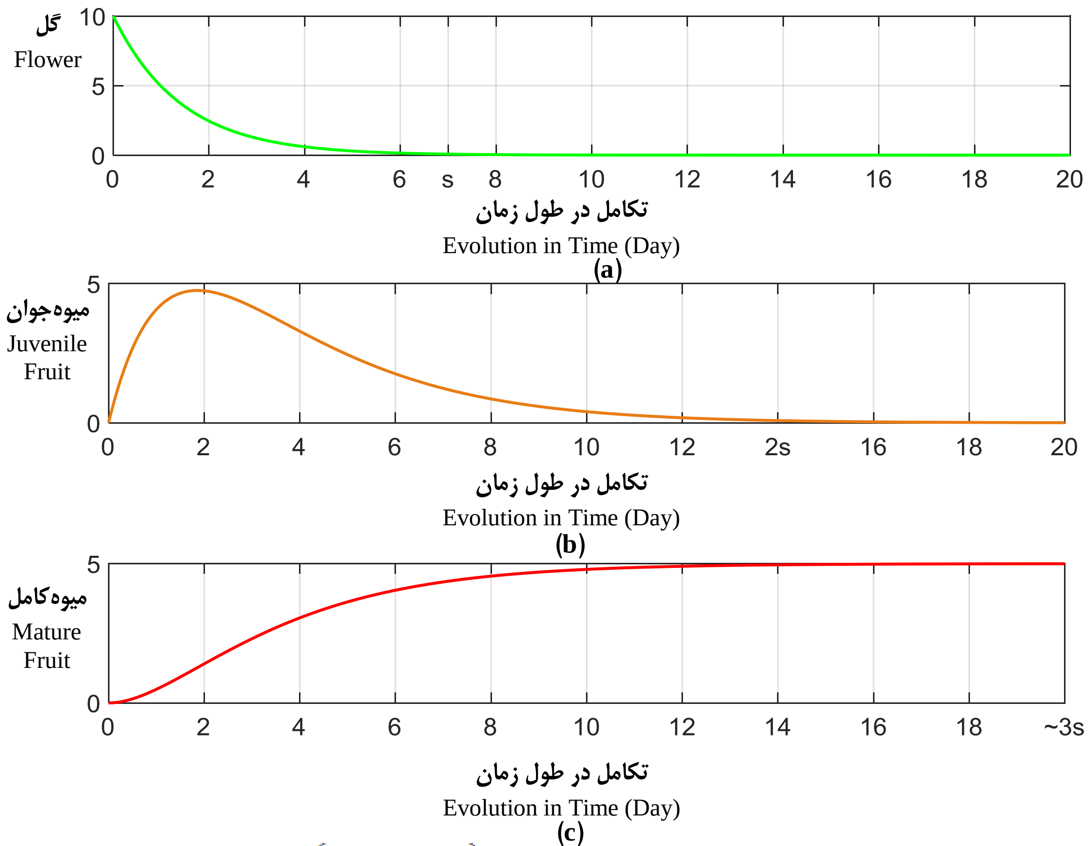
۱. نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل برابر با نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت است. $(\xi = \beta = 0.2)$

مشابه بررسی انجام شده در حالت اول، از آنجاییکه نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل برابر با نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت است، در نتیجه تعداد میوه‌های جوانی که به میوه کامل تبدیل می‌شوند برابر هستند با تعدادی از آن‌ها که در اثر آفت نابود می‌شوند. مطابق شکل ۴، تعداد گل‌ها در $t = s$ تقریبا به صفر رسیده است و تمام گل‌ها به میوه جوان تبدیل شدند. همچنین در $t = 2s$ تعدادی از میوه‌های جوان به میوه کامل تبدیل شدند و تعدادی در اثر آفت از بین رفته‌اند. در نهایت در $t = 3s$، با توجه به برابر بودن نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل با نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت، از ۱۰ گل تعداد ۵ عدد به میوه کامل تبدیل شدند و ۵ عدد باقی مانده در اثر آفت نابود شدند. جدول ۲ نیز بیانگر تعداد گل، میوه جوان و میوه کامل در هر روز برای حالت دوم $(\xi = \beta = 0.2)$ است.

جدول ۲- تعداد گل، میوه جوان و میوه کامل به تفکیک در حالت دوم $(\xi = \beta = 0.2)$

Table 2- Number of flowers, juvenile fruit and mature fruit separately in the second case $(\xi = \beta = 0.2)$

روز Day / تعداد Number	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
گل Flower	~2	~1	0	0	0	0	0	0	0	**0**
میوه جوان Juvenile Fruit	5>	4>	3>	2>	1>	1>	1>	0	0	**0**
میوه کامل Mature Fruit	1<	3<	5>	5>	5	5	5	5	5	**5**



شکل ۴- مراحل رشد توت فرنگی در حالت دوم $(\xi = \beta = 0.2)$

Figure 4- Strawberry growth stages in the second case $(\xi = \beta = 0.2)$

(a): Flower, (b): Juvenile Fruit, (c): Mature Fruit

۲. نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل از نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت کمتر باشد. $(\xi < \beta = 0.3)$

مشابه روند طی شده در دو حالت قبل، با در نظر داشتن بیشتر بودن نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل از نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت، تعداد میوه‌های جوانی که به میوه کامل تبدیل می‌شوند کمتر از آن تعدادی هستند که در اثر آفت نابود می‌شوند. جدول ۳ نشان دهنده تعداد گل، میوه جوان و میوه کامل در هر روز است.

جدول ۳- تعداد گل، میوه جوان و میوه کامل به تفکیک در حالت سوم $(\xi < \beta = 0.3)$

Table 3- Number of flowers, juvenile fruit and mature fruit separately in the third case $(\xi < \beta = 0.3)$

روز Day / تعداد Number	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
گل Flower	~2	1>	0	0	0	0	0	0	0	**0**
میوه جوان Juvenile Fruit	4	~3	2>	1>	1>	0	0	0	0	**0**
میوه کامل Mature Fruit	1	3	4>	4>	4	4	4	4	4	**4**

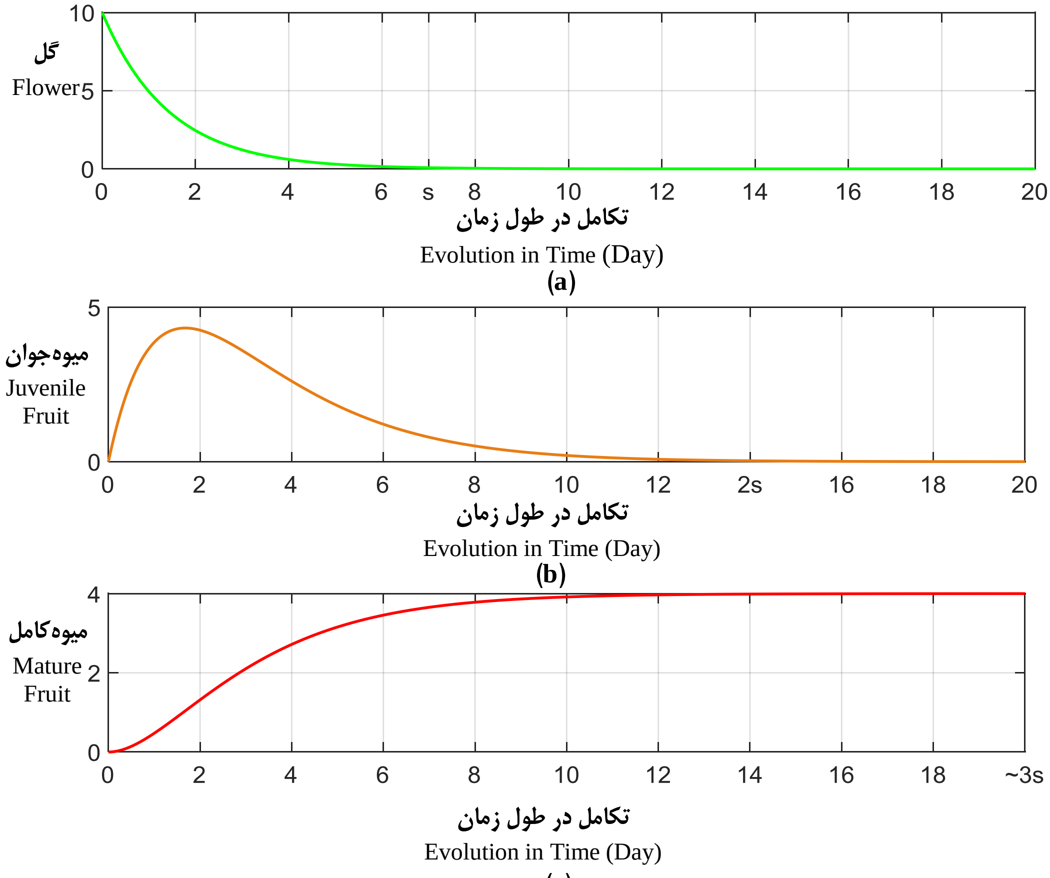
بطور مشابه و مطابق شکل ۵، تعداد گل‌ها در $t = s$ تقریبا به صفر رسیده است و تمام گل‌ها به میوه جوان تبدیل شدند. در $t = 2s$ تعدادی از میوه‌های جوان به میوه کامل تبدیل شدند و تعدادی در اثر آفات از بین رفته اند و در $t = 3s$، با توجه بیشتر بودن نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل با نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت، از ۱۰ گل تعداد ۴ عدد به میوه کامل تبدیل شدند و ۶ عدد در اثر آفت نابود شدند.

مقایسه مدل‌سازی مذکور با سایر مدل‌ها

در این بخش به نحوه مدل‌سازی در دیگر آثار می‌پردازیم. هدف تحقیقات بهرام و همکاران در مقاله (Andarzian, 2007) ساخت و شبیه‌سازی یک مدل در نرم افزار CDSs-Model بوده است تا بتواند مراحل رشد گیاه گندم را براساس مقیاس‌های موجود رشد، شبیه‌سازی و پیش‌بینی نماید. همچنین در مطالعه‌ای که توسط رضا و همکاران در مقاله (Dihimfard, 2012) انجام شده است نیز به بررسی مراحل رشد یکی دیگر از گیاهان زراعی، چغندر، پرداخته شده است. دو مدل ذکر شده را می‌توان مدل هایی تجربی در نظر گرفت که عمدتاً مبتنی بر روش‌های آماری هستند که روابط همبستگی بین فرآیندها را مورد استفاده قرار می‌دهند و مبتنی بر روابط مشتق شده از آنالیز رگرسیون و بر یافته‌های حاصل از تحقیقات در شاخه‌های مختلف علوم از قبیل هواشناسی، کشاورزی، خاک و غیره می‌باشد. این مدل‌ها عمدتاً مبتنی بر روابط رگرسیونی هستند که همبستگی عملکرد گیاه با داده‌های اقلیمی هواشناسی و عوامل مدیریتی (مثل آبیاری و دفع آفات) را نشان می‌دهند. از آنجاییکه این نوع مدل‌ها در واقع باز توصیف ریاضی از داده‌ها هستند بنابراین فقط قادر به پیش بینی عملکرد در مقیاس محلی می‌باشند و قادر به افزایش شناخت ما از داده‌ها نیستند و حاوی هیچ شناختی از سیستم نیست. اما مدل در نظر گرفته شده در این مقاله رابطهٔ بین فرآیندهای مختلف گیاهی و محیط را محاسبه می‌کند. علاوه بر این، ساختمان مدل مبتنی بر فرآیندهای واقعی رخ داده در سیستم مورد نظر است. همچنین بر خلاف مدل قبلی توصیف مبتنی بر شناخت از سیستم است. یکی از مزیت‌های این نوع مدل‌سازی قابل اجرا بودن آن در هر منطقه (تغییر در میزان آفات) با تغییرات اندکی در پارامترها می‌باشد که به سادگی می‌توان روند رشد گیاه را در آینده پیش بینی کرد.

بحث

مدل معرفی شده در این مقاله مراحل رشد و نمو گیاه توت فرنگی را شبیه‌سازی و پیش‌بینی کرده که امکان بررسی و تفسیر فرآیند رشد سیستم در مواجهه با انواع متغیرها یا پارامترهای مختلف در یک وضعیت واقعی را فراهم می آورد. همچنین تحلیل و پیش‌بینی رفتارات بالقوه با استفاده از مدل‌سازی کامپیوتری فراهم شده است. در نهایت سه حالت مهم برای نرخ‌های مختلف سیستم با توجه به شرایطی که امکان دارد در واقعیت با آن مواجه شویم در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی لازم با استفاده از نرم افزار متلب (MATLAB) برای بررسی آن‌ها انجام شده است. این نرم افزار می‌تواند به عنوان یک ابزار کمکی برای پیش‌بینی مراحل رشد این گیاه در مناطق مختلف به منظور بهبود مدیریت و عملکرد (مصرف کودها، آفات کش‌ها، تغذیه گیاه، آب و هوای مطلوب و...) مورد استفاده قرار گیرد.



(c)

شکل ۵- مراحل رشد توت فرنگی در حالت سوم $(\xi < \beta = 0.3)$

Figure 5- Stages of strawberry growth in the third state $(\xi < \beta = 0.3)$

(a): Flower, (b): Juvenile Fruit, (c): Mature Fruit

مدل مذکور، مدلی ساده ولی در عین حالت کاربردی می‌باشد که به پارامترهای کمتری برای پیش بینی نیاز دارد اما تفسیر نتایج به دست آمده از آن آسان تر می‌باشد. در هر مرحله از شبیه‌سازی نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل و نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفات برای زمانیکه در اثر عوامل محیطی و تغذیه‌ای و شرایط نامناسب، آفات با نرخ بیشتری به گیاه صدمه بزنند یا زمانیکه این دو نرخ برابر بوده و در نهایت زمانیکه آفات تاثیر چندانی روی میوه‌ها نداشته باشند بررسی شده و به‌خوبی مشخص است که زمانیکه نرخ تبدیل میوه جوان به میوه کامل از نرخ نازک شدن میوه‌های جوان در اثر آفت بیشتر باشد تعداد بیشتری از میوه‌ها سالم باقی می‌مانند اما زمانیکه نرخ تبدیل به میوه کامل از نابودی میوه در اثر آفت بیشتر باشد میوه‌های بیشتری نابود می‌شوند، یا در صورت برابری این دو نرخ، تعداد میوه‌های سالم و آفت زده با هم برابر هستند.

مدل‌سازی ما را قادر کرد تا پیش‌بینی‌های کمی و قاطعی را در مورد فرآیند رشد گیاه توت فرنگی، که متاثر از محیط اطراف است، انجام دهیم. از این طریق، توانستیم درستی و کارایی مطالعات تئوری‌ای را نیز بیازماییم. به این صورت که با مدل‌سازی هر مرحله از رشد در یک دوره زمانی و در یک ناحیه مشخص و اعمال آن به زمان و منطقه دیگر، می‌توان کمک موثری به مسئولان امر در جهت اعمال تمهیدات مدیریتی لازم برای بهبود عملکرد کرد. با این حال، باید در نظر داشت که مدل‌ها نمایش ساده‌ای از رفتار واقعی سیستم هستند و لذا قادر به بیان کامل رفتار سیستم در شرایط واقعی نخواهند بود. یک مدل کامل نیز هرگز وجود نداشته و در آینده نیز وجود نخواهد داشت زیرا مبنای روش مدل‌سازی، ساده‌سازی بخش مورد نیاز واقعیت است. اما می‌توان با در نظر گرفتن عوامل بیشتری که در روند رشد این گیاه تاثیر گذارند، مانند: میزان کوددهی در هر مرحله از رشد، تغییرات آب و هوایی، نوسانات اقتصادی بازار، عرضه و تقاضا و بسیاری از جنبه‌های دیگر با رویکرد فوق و ایجاد یک مدل جدید روند رشد را مورد مطالعه قرار داده و پیش‌بینی کامل‌تری انجام داد.

محدودیت‌هایی همچون کمبود زمان، اقلیم نامطلوب، هزینه زیاد،

امکانات کم و نبود نیروی متخصص مانع از آزمایش و کشت در مناطق باغی و آزمایشگاهی خصوصا در کشورهای در حال توسعه هستند. در نتیجه الزام به استفاده از مدل برای پیش بینی روند رشد گیاه در آینده احساس می‌شود. مدل مذکور از طریق شبیه سازی این امکان را برای گلخانه داران فراهم می سازد تا محیط مورد نظر برای کشت را کنترل و تاثیر عوامل محیطی همچون آفات و بیماری‌ها را به تفکیک بررسی کند زیرا با استفاده از مدل، عوامل محیطی تحت کنترل قرار می‌گیرند و تاثیر میزان آفت کش‌ها به تفکیک قابل مطالعه است. همچنین استفاده از این نوع مدل شبیه‌سازی می‌تواند به برنامه ریزی کشاورزی در کشورهای در حال توسعه کمک کند.

در بسیاری از کشورها تعداد کمی از انواع خاک و شرایط آب و هوایی و بطور کلی اقلیم برای کشاورزی وجود دارد که آزمایش برای بررسی روند رشد گیاه در آن‌ها غیر ممکن است. همچنین آزمایش در همه اقلیم‌ها با آب و هوای مطلوب نیز صرفه اقتصادی ندارد. اما با استفاده از مدل و در دست داشتن داده‌های مرتبط با تغییرات آب و هوایی و نرخ رشد گیاه در سال‌های متمادی در مناطق دیگر می‌توان دستورالعمل‌های ساده‌ای برای گلخانه‌داران وضع کرد تا بتوانند عملکرد گیاه را برای اقلیم‌هایی که گیاه تا کنون در آن‌ها کاشته نشده است را پیش‌بینی کنند.

نتیجه‌گیری

از نتیجه‌های این پژوهش می‌توان چنین نتیجه گرفت که، گلخانه داران با در نظر گرفتن اطلاعات محیطی از منطقه ای که تصمیم به کاشت گیاه در آن دارند و اطلاع از نرخ‌های موثر در روند رشد گیاه و در دست داشتن مدل می‌توانند چندین فصل رشد را در عرض چند ثانیه شبیه‌سازی کنند و به پیش بینی میزان برداشت و ضرر محصول خود بپردازند. گلخانه‌دار می‌تواند با کمک گرفتن از متخصصین باغبانی و اطلاع از محیط و اقلیمی که در آن قرار دارد و استفاده از نرخ‌های مختلف تاثیرگذار در رشد گیاه در منطقه موردنظر و داده‌های صحیح از گیاه، خاک، آب و هوا، تعداد گیاهان سالم و آفت زده و به‌طور کلی عملکرد گیاه را قبل از برداشت، پیش‌بینی کرده تا به حصول و بهبود عملکرد خود کمک کند. علاوه بر این با این مدل می‌توان دستورالعمل‌های تصمیم گیری برای گلخانه داران و بدون نیاز به آزمایش‌های مزرعه‌ای تهیه نمود. مدل ارائه شده کارایی لازم در پیش‌بینی رشد و عملکرد گیاه را دارد. همچنین این مدل با داشتن روابطی ساده و در عین حال در برگیرنده مفهوم کلی رشد، می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای تعلیم و آموزش نحوه رشد و نمو گیاه توت فرنگی و یک وسیله آموزشی و تحقیقاتی برای تجزیه و تحلیل عوامل موثر روی رشد گیاه برای دانشجویان نیز بسیار مفید باشد. با استفاده از این مدل می‌توان به بررسی مفهوم چگونگی واکنش گیاه به عوامل محیطی همچون آفات و همچنین عوامل مدیریتی موثر روی محیط و آب و هوای ایجاد شده برای رشد گیاه پرداخت.

منابع

1. Abbasi Z., Zamani I., Amiri Mehra A.H., Shafieirad M., and Ibeas A. 2020. Optimal Control Design of Impulsive SQEIAR Epidemic Models with Application to COVID-19. Chaos, Solitons & Fractals 139: 110054. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110054.
2. Amiri Mehra A.H., Zamani I., Abbasi Z., and Ibeas A. 2019. Observer-Based Adaptive PI Sliding Mode Control of Developed Uncertain SEIAR Influenza Epidemic Model Considering Dynamic Population. Journal of Theoretical Biology 482: 109984. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2019.08.015.
3. Amiri Mehra A.H., Shafieirad M., Abbasi Z., and Zamani I. 2020. Parameter Estimation and Prediction of COVID-19 Epidemic Turning Point and Ending Time of a Case Study on SIR/SQAIR Epidemic Models. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/1465923.
4. Abbasi Z., Zamani I., Amiri Mehra A.H., Ibeas A., and Shafieirad M. 2021. Optimal Allocation of Vaccine and Antiviral Drugs for Influenza Containment over Delayed Multi-Scale Epidemic Model Considering Time-Dependent Transmission Rate. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/4348910.
5. Andarzian B., Bakhshandeh A., Fathi Q., Khalil Alemi S., Banayan M., and Imam Y. 2007. A Model for Simulating the Developmental Stages of Crops. Agriculture and Horticulture 71-79. (In Persian)
6. Behtri B. 2014. Mathematical Models of Crop Growth and Operation. 228 pages. (In Persian)
7. Bessonov N., and Volpert V. 2000. Dynamical Models of Plant Growth, Mathematics Subject Classification.
8. Bessonov N., Morozova N., and Volpert V. 2008. Modeling of Branching Patterns in Plants. Bulletin of Mathematical Biology 70(3): 868-893. https://doi.org/10.1007/s11538-007-9282-1.
9. Danaeifar A., Gholami M., Mobli M., and Bani Nasab B. 2020. The Effect of Paclobutrazol and Calcium Prohexadione on Some Physiological Characteristics and Quality of Strawberry Fruit of Parus Cultivar. Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 21(1): 1-10. (In Persian with English abstract).

http://dx.doi.org/10.29252/jcpp.9.2.1.

10. Dihimfard R., Nasiri Mahallati M., and Kouchaki A. 2012. A Simple Model to Simulate the Growth, Development and Yield of Sugar Beet in Terms of Potential and Nitrogen Limitation. Journal of Ecological Agriculture 1-20.
11. Ghaem Maghami F., Zarei M., Yathribi J., and Eshghi S. 2019. The Effect of Different Levels of Nitrogen, Vermicompost and Nitrogen on Morphological Characteristics. Greenness Index and Strawberry Yield in Greenhouse Conditions, Iranian Journal of Horticultural Sciences and Techniques 251-262. (In Persian). https://civilica.com/doc/1160179/.
12. Godin C., and Caraglio Y. 1998. A Multiscale Model of Plant Topological Structures. Journal of Theoretical Biology 191(1): 1-46. https://dx.doi.org/10.1006/jtbi.1997.0561.
13. Hosseini Farahi M., Jamshidi E., Amiri S., Kamyab F., and Radi M. 2020. Quality, Phenolic Content, Antioxidant Activity, and the Degradation Kinetic of Some Quality Parameters in Strawberry Fruit Coated with Salicylic Acid and *Aloe vera* Gel. Journal of Food Processing and Preservation 44(9): 14647. https://doi.org/10.1111/jfpp.14647.
14. Kuhar T., and Pfeiffer D. 2009. Insect Pests of Strawberries and Their Management, Virginiafruit.ento.vt.edu.
15. Ikegawa Y., Mori K., Ohasa M., Fujita I., Watanabe T., Ezoe H., and Namba T. 2016. A Theoretical Study on Effects of Cultivation Management on Biological Pest Control: A Spatially Explicit Model. Biological Control 93: 37-48. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.11.008.
16. Jaeger M., and Reffye D. 1992. Basic Concepts of Computer Simulation of Plant Growth. Journal of Biosciences 17: 275-291. http://dx.doi.org/10.1007/BF02703154.
17. Salimi F., Ahmadian A., Alipnah M., and Kaveh H. 2016. Strawberries, an Alternative Product for Sustainable Agriculture. The First National Symposium on Small Fruits, Shiraz University 179-185. (In Persian)
18. Varenne F. 2018. From Models to Simulations. London, UK: Routledge, 244. https://doi.org/10.4324/9781315159904
19. Zamani I., and Hosseini Farahi M. 2016. A Hybrid State Space Modelling Study on Effects of Cultivation Management on Biological Pest Control for Strawberry Plants. VIII International Strawberry Symposium 1156: 817-820. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1156.120.